

XP-002287406

AN - 2004-220038 [21]

AP - JP20020229349 20020807

CPY - FUIT

DC - L03 P81 V07

FS - CPI;GMPI;EPI

IC - G02B6/00 ; G02B6/12 ; G02F1/095

MC - L03-G02 L04-A02A2B L04-A02C2 L04-F04

- V07-K03

PA - (FUIT) FUJITSU LTD

PN - JP2004070012 A 20040304 DW200421 G02F1/095 015pp

PR - JP20020229349 20020807

XA - C2004-087648

XIC - G02B-006/00 ; G02B-006/12 ; G02F-001/095

XP - N2004-174404

AB - JP2004070012 NOVELTY - The rotator (10) includes a core layer (12) comprising manganese doped indium phosphide layer (12a) and indium-gallium-arsenic-phosphide (InGaAsP) layer (12b), pinched between non-doped indium phosphide clad layer (11) and manganese doped indium phosphide clad layer (13). The InGaAsP layer has refractive index larger than the refractive indices of the phosphide layers (12a,13).

- DETAILED DESCRIPTION - An INDEPENDENT CLAIM is also included for waveguide type Faraday rotator manufacture.

- USE - Waveguide type Faraday rotator used with optical devices like semiconductor laser, optical amplifier, photosynthesizer/splitter in semiconductor integrated optical element used in 1.3 and 1.55 microns m wavelength band optical communication system.

- ADVANTAGE - The manganese dope enhances interaction of light within the waveguide and reduces loss.

- DESCRIPTION OF DRAWING(S) - The figure shows a partially expanded sectional view of the Faraday rotator.

- Faraday rotator 10

- indium phosphide clad layers 11,13

- core layer 12

- manganese doped indium phosphide layer 12a

- InGaAsP layer 12b

- (Dwg.1/7)

IW - WAVEGUIDE TYPE FARADAY ROTATING SEMICONDUCTOR INTEGRATE OPTICAL ELEMENT INDIUM PHOSPHIDE CORE CLAD LAYER DOPE MANGANESE

IKW - WAVEGUIDE TYPE FARADAY ROTATING SEMICONDUCTOR INTEGRATE OPTICAL ELEMENT INDIUM PHOSPHIDE CORE CLAD LAYER DOPE MANGANESE

NC - 001

OPD - 2002-08-07

ORD - 2004-03-04

PAW - (FUIT) FUJITSU LTD

TI - Waveguide-type Faraday rotator in semiconductor integrated optical element, includes indium phosphide core and clad layers doped with manganese

THIS PAGE BLANK (USPTO)

(19) 日本国特許庁(JP)

## (12) 公開特許公報(A)

(11) 特許出願公開番号

特開2004-70012

(P2004-70012A)

(43) 公開日 平成16年3月4日(2004.3.4)

(51) Int. Cl.<sup>7</sup>

F I

テーマコード (参考)

G02F 1/095

G02F 1/095

2H038

G02B 6/00

G02B 6/00 316

2H047

G02B 6/12

G02B 6/12 L

2H079

審査請求 未請求 請求項の数 5 O L (全 15 頁)

(21) 出願番号 特願2002-229349 (P2002-229349)

(22) 出願日 平成14年8月7日(2002.8.7)

(71) 出願人 000005223

富士通株式会社

神奈川県川崎市中原区上小田中4丁目1番  
1号

(74) 代理人 100092152

弁理士 服部 毅殿

(72) 発明者 原 真二郎

神奈川県川崎市中原区上小田中4丁目1番  
1号 富士通株式会社内

Fターム(参考) 2H038 BA35

2H047 KA03 MA07 NA06 PA06 QA02

RA08

2H079 AA03 BA02 CA06 DA16 EA07

JA00

(54) 【発明の名称】 導波路型ファラデー回転素子およびその製造方法

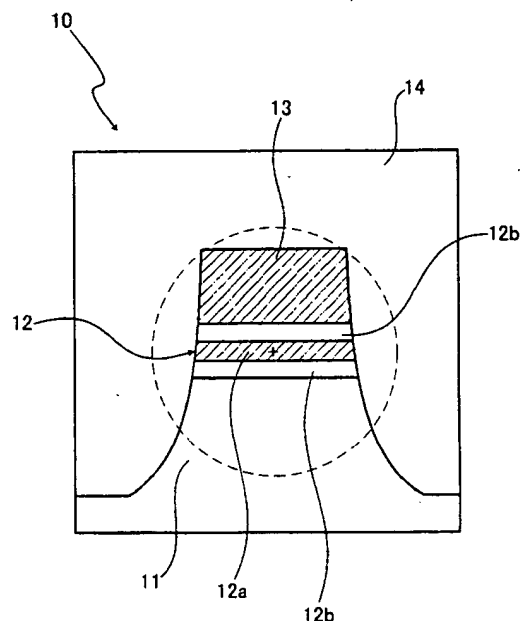
## (57) 【要約】

【課題】 光デバイスと集積可能で高性能な導波路型ファラデー回転素子を製造する。

【解決手段】 InPクラッド層11上に、InP:Mn層12aがInGaASP層12bで挟まれたInP:Mn/InGaASPコア層12を形成し、その上にInP:Mnクラッド層13を形成して、導波路型ファラデー回転素子10を形成する。これにより、導波路型ファラデー回転素子10をInP系の半導体材料を用いて製造することができるとともに、導波路内を伝播する光がMnを含んだ層とオーバーラップする領域が増加し、光とMnとの相互作用が高められる。また、Mnを、InP:Mn層12aやInP:Mnクラッド層13の形成時あるいはこれらの層の下層になる半導体層の成長時に導入することにより、InP:Mn層12aおよびInP:Mnクラッド層13にMnを有効に導入することができる。

【選択図】

図1



## 【特許請求の範囲】

### 【請求項1】

光を伝播するコア層とこのコア層を挟む一対のクラッド層とを有する導波路構造を備えた導波路型ファラデー回転素子において、

磁性元素を含む半導体である磁性半導体からなる磁性半導体層が、前記磁性半導体層の屈折率よりも高い屈折率の半導体層によって挟まれた構造を有するコア層と、

前記半導体層の屈折率よりも低い屈折率の磁性半導体からなるクラッド層と、

を有することを特徴とする導波路型ファラデー回転素子。

### 【請求項2】

前記コア層は、前記磁性半導体層と前記半導体層とが積層された超格子構造を有していることを特徴とする請求項1記載の導波路型ファラデー回転素子。

### 【請求項3】

前記磁性半導体層は、前記磁性元素を含むInP層またはInGaP層であり、前記半導体層は、InGaAs層またはInGaAsP層であることを特徴とする請求項1記載の導波路型ファラデー回転素子。

### 【請求項4】

光を伝播するコア層とこのコア層を挟む一対のクラッド層とを有する導波路構造を備えた導波路型ファラデー回転素子の製造方法において、

磁性元素を導入しながら一の半導体層を成長する工程と、

前記磁性元素を導入しながら成長された前記一の半導体層の上に、前記磁性元素を取り込むことのできる性質を有する半導体を成長して磁性半導体層を形成する工程と、

を有することを特徴とする導波路型ファラデー回転素子の製造方法。

### 【請求項5】

光を伝播するコア層とこのコア層を挟む一対のクラッド層とを有する導波路構造を備えた導波路型ファラデー回転素子の製造方法において、

InGaAs層またはInGaAsP層を成長する工程と、

前記InGaAs層の上または前記InGaAsP層の上に、磁性元素を導入しながらInP層またはInGaP層を成長する工程と、

を有することを特徴とする導波路型ファラデー回転素子の製造方法。

## 【発明の詳細な説明】

### 【0001】

#### 【発明の属する技術分野】

本発明は導波路型ファラデー回転素子およびその製造方法に関し、特に磁性半導体材料を用いて形成されて半導体レーザなどの光デバイスと集積することのできる導波路型ファラデー回転素子およびその製造方法に関する。

### 【0002】

#### 【従来の技術】

光通信システムで用いられる半導体レーザなどの光デバイスを集積した半導体光集積素子は、InPやGaAsに代表される化合物半導体基板上に形成されている。一方、磁気光学効果を利用した光アイソレータなどの光素子は、YIG（イットリウム-鉄-ガーネット）単結晶や常磁性ガラスといった光学結晶を用いて形成されている。光アイソレータは、端面などからの反射光が半導体レーザの活性層内へ戻るのを防ぐことができ、素子自体の小型化や他の部品との高集積化を図るためにも、半導体レーザなど同一基板上に整合性良く集積することが望まれている。しかし、光アイソレータを構成する材料の物性（格子定数、熱膨張係数など）は、化合物半導体材料とは大幅に異なり、光アイソレータと半導体レーザなどの光デバイスとの集積化は極めて困難であった。

### 【0003】

このような課題に対し、磁性イオンをIII-V族化合物半導体に添加した、いわゆるII-V族希薄磁性半導体（Diluted Magnetic Semiconductor, DMS）を用いてファラデー回転素子を構成する方法が提案されている（T.

10

20

30

40

50

Kuroiwa et al., Electronics Letters, Vol. 34, No. 2, P. P. 190-192 (1998)). 半導体レーザなどと集積すべきファラデー回転素子にDMS材料を用いることで、化合物半導体基板上への集積が容易になると期待されている。

#### 【0004】

近年では、このような提案を基に、III-V族のDMS材料を光アイソレータなどの素子に利用することに関していくつかの提案がなされている。

例えば、特開2000-21671号公報では、III-V族化合物半導体材料系の導波路型光アイソレータの作製においても提案されているように、ホストのGaAs層にMnAs磁性微粒子（クラスタ）を埋め込んだ、いわゆるGaAs:MnAsハイブリット構造をコア層に用いる方法が提案されている。このような構造のコア層を形成することで、導波路にアイソレータとしての機能を持たせるとともに、整合性の改善や高いファラデー効果の実現などが試みられている。

#### 【0005】

さらに、特開平9-293924号公報では、III-V族DMS材料に印加する磁場の強さを制御することにより、単一モード発振する半導体レーザの発振波長を連続的に変化させることが可能な構造が提案されている。

#### 【0006】

また、特許第3130131号では、III-V族化合物半導体をベースとしたDMSであるが、可視光の波長帯で透明なCdMnTeを用いた、導波路型光アイソレータが提案されている。

#### 【0007】

ところで、現在の光通信システムにおいては、1.55 $\mu$ m、1.3 $\mu$ m波長帯用の光デバイスが多く用いられるが、このような光デバイスには、化合物半導体材料として特にInGaAsPなどのInP系化合物半導体材料が広く利用されている。そのため、このようなInP系化合物半導体材料を用いて導波路型ファラデー回転素子を形成し、光デバイスと集積できるようにすることが望まれている。

#### 【0008】

##### 【発明が解決しようとする課題】

しかし、一般に、InP系化合物半導体材料を用いて例えば半導体レーザと光導波路との半導体光集積素子における通常の素子構造を作製すると、その光導波路のコア層に閉じ込められる光分布は全体の20%~30%程度でしかない。すなわち、このような半導体光集積素子では、半導体レーザから出射されて光導波路を伝播する光のうち、その多くはコア層を挟んで形成されているクラッド層側に染み出してしまっていることになる。

#### 【0009】

このような状況の中、半導体レーザなどの光デバイスと集積すべき導波路型ファラデー回転素子のコア層を、特開2000-21671号公報で提案されたGaAs:MnAsハイブリット構造とする場合を想定する。ところが、この場合には、磁性元素が存在しているコア層内部での光強度分布が小さいことで、光と磁性元素との間の十分な相互作用が得られず、導波路を伝播するレーザ光に対して十分なファラデー効果が得られない可能性が生じる。一方で、GaAs:MnAsハイブリット構造を適用することで、MnAsクラスタがコア層に含まれるため伝播する光の損失が起こり、コア層内のMnAs濃度をむやみに増加することはできない。

#### 【0010】

また、特開平9-293924号公報では、発振波長を制御するために設けられた導波路としての磁性半導体層を、InPあるいはInGaAsPとMnAsとの（多層）積層構造やInGaMnAsP混晶で構成している。これらは、有機金属気相成長（MOVPE）法による結晶成長を用いて形成されている。しかし、ここで開示されている結晶成長条件やそのとき導入するMn組成比では、Mnの表面偏析現象やMnPクラスタの形成が起こるため、平坦なInGaAsP/MnAs積層構造やInGaMnAsP混晶を形成す

るのは困難であった。

#### 【0011】

また、特許第3130131号では、II-V族化合物半導体ベースのDMSの場合、添加される磁性原子が、CdなどのII族原子のサイトを容易に置き換え得るため、CdMnTeを用いた超格子構造などの結晶成長が比較的容易に行える。しかし、例えばMnをGaAsに添加したIII-V族ベースのDMSの場合には、やはり結晶成長におけるMnの表面偏析現象の発生やMnAsクラスタの形成といった問題が生じる。そのため、II-V族での結晶成長技術やヘテロ接合構造を単純にIII-V族系に適用するのは難しいといった課題が残されている。

#### 【0012】

さらに、II-V族化合物半導体ベースのDMSは、III-V族ベースのDMSと比較して、単位長さ当たりのファラデー回転角が $1/20$ 以下と極めて小さいという課題も有している。この単位長さ当たりの回転角に関しては、例えば、「H. Akinağa et al., APPL. PHYS. Lett., vol. 76, No. 1, P. 97-99 (2000)」や、「J. F. Dillon, Jr. et al., J. APPL. PHYS., vol. 67, No. 9, P. 4917-4919 (1990)」などに詳細に論じられている。単位長さ当たりのファラデー回転角が小さいという課題は、現在広く光通信で用いられる $1.3\mu\text{m}$ 、 $1.55\mu\text{m}$ 波長帯においても同様に残る。

#### 【0013】

本発明はこのような点に鑑みてなされたものであり、光通信用光デバイスとの集積が可能で高性能な導波路型ファラデー回転素子およびその製造方法を提供することを目的とする。

#### 【0014】

##### 【課題を解決するための手段】

本発明では上記課題を解決するために、図1に示す構成例の導波路型ファラデー回転素子が提供される。本発明の導波路型ファラデー回転素子は、光を伝播するコア層とこのコア層を挟む一対のクラッド層とを有する導波路構造を備えた導波路型ファラデー回転素子において、磁性元素を含む半導体である磁性半導体からなる磁性半導体層が、前記磁性半導体層の屈折率よりも高い屈折率の半導体層によって挟まれた構造を有するコア層と、前記半導体層の屈折率よりも低い屈折率の磁性半導体からなるクラッド層と、を有することを特徴とする。

#### 【0015】

図1に示すような導波路型ファラデー回転素子10では、コア層であるInP:Mn/InGaAsPコア層12が、磁性半導体層であるInP:Mn層12aを有しており、さらに、InP:Mnクラッド層13も磁性半導体であるInP:Mnを用いて形成されている。このように、コア層およびクラッド層に磁性元素が含まれるようにすることで、導波路内を導波する光と導波路内の磁性元素との相互作用が効果的に高められるようになる。

#### 【0016】

また、本発明では、光を伝播するコア層とこのコア層を挟む一対のクラッド層とを有する導波路構造を備えた導波路型ファラデー回転素子の製造方法において、磁性元素を導入しながら一の半導体層を成長する工程と、前記磁性元素を導入しながら成長された前記一の半導体層の上に、前記磁性元素を取り込むことのできる性質を有する半導体を成長して磁性半導体層を形成する工程と、を有することを特徴とする導波路型ファラデー回転素子の製造方法が提供される。

#### 【0017】

このような導波路型ファラデー回転素子の製造方法は、例えば、InGaAsP層を一の半導体層とし、その上に、磁性元素であるMnを含む半導体層であるInP:Mn層を磁性半導体層として形成する際に、適用することができる。すなわち、InP:Mn層の形

10

20

30

40

50

、この層の下層になるInGaASP層の成長時にMnを導入する。その際、導入MnはInGaASP層表面に偏析するようになる。しかし、この上にInPを成  
と、Mn-As間に比べてMn-P間の結合エネルギーの方が大きいために、偏析し  
がInPに取り込まれ、InP:Mn層が形成されるようになる。

18】

、本発明では、InGaAs層またはInGaASP層を成長する工程と、前記I  
AS層の上または前記InGaASP層の上に、磁性元素を導入しながらInP層  
InGaP層を成長する工程と、を有することを特徴とする導波路型ファラデー回  
の製造方法が提供される。

19】

うな導波路型ファラデー素子の製造方法では、例えば磁性元素としてMnを用いた  
Mn-As間およびMn-P間の結合エネルギーの差を利用し、Mnを導入しながら  
層またはInGaP層を成長すること、その内部にMnが固定されるようになる

20】

【実施の形態】

本発明の実施の形態を、図面を参照して詳細に説明する。

第1の実施の形態について説明する。

21】

第1の実施の形態の導波路型ファラデー回転素子の層構造の一部を示す図である。  
実施の形態の導波路型ファラデー回転素子10は、InPクラッド層11上に、M  
有したInP層(InP:Mn層)12aがアンドーフのInGaASP層12b  
れた、InP:Mn/InGaASPコア層12を有している。さらに、このIn  
In/InGaASPコア層12上に、Mnを含有したInP:Mnクラッド層13  
されている。このように順に積層されたInPクラッド層11、InP:Mn/I  
ASPコア層12およびInP:Mnクラッド層13は、メサ構造に形成されてい  
して、その全体をInP埋め込み層14によって埋め込まれ、導波路型ファラデー  
子10の層構造が形成されている。

22】

、各層の屈折率は、InP:Mn/InGaASPコア層12については、InP  
層12aの屈折率よりも、InGaASP層12bの屈折率が高くなっている。こ  
P:Mn/InGaASPコア層12を挟んでいるInPクラッド層11およびI  
Mnクラッド層13は、InGaASP層12bよりも屈折率が低くなっている。

23】

型ファラデー回転素子10においては、このような各層の屈折率差によってInP  
/InGaASPコア層12に光が閉じ込められ、InP:Mn/InGaASP  
12が導波路としての役割を果たすようになる。すなわち、半導体レーザなどの光  
スから導波路型ファラデー回転素子10に光が伝播されると、その光はInP:M  
nGaASPコア層12内を導波する。そして、磁性体と半導体という性質を併せ  
性半導体層であるInP:Mn層12aの磁気光学効果により、導波する光に対し  
ラデー効果が発現される。

24】

、この第1の実施の形態の導波路型ファラデー回転素子10では、InP:Mn/  
aASPコア層12内のInP:Mn層12aだけでなく、InP:Mnクラッド  
にも、Mnが含有されている。

25】

1.55 $\mu$ m帯のInGaASP/InP系半導体レーザを光導波路と集積した半  
集積素子を作製する場合には、光導波路のコア層を構成するInGaASPは、発  
に対して1.3 $\mu$ m波長帯に相当する組成を持つものを用いる。しかし、この場合  
層に閉じ込められる光分布は全体の20~30%程度であり、導波する光の大部分

10

20

30

40

50

は、InPクラッド層側に染み出すことになる。

#### 【0026】

しかし、この第1の実施の形態の導波路型ファラデー回転素子10を集積し、伝播する光に対して磁気光学効果を得ようとする場合には、Mnを含有させたInP:Mn層12aのほかにInP:Mnクラッド層13が存在することで、光とMnとの相互作用がより高められるようになる。すなわち、図1中破線で示したような広がりを持った光は、Mnを含有した層とオーバーラップする領域が増えることになり、Mnを含有させたInP:Mnクラッド層13を設けることで、光分布全体の45%程度をMnとの相互作用に寄与させることが可能になる。

#### 【0027】

また、光とMnとの相互作用を高めることを目的としてコア層内のMn濃度を著しく増加させることがないので、コア層を導波する光の損失も回避することが可能である。

#### 【0028】

次に、この第1の実施の形態に係る導波路型ファラデー回転素子10の製造方法について説明する。

ここで、まず、磁性元素であるMnをInP系化合物半導体中に混入させた場合におけるMnの表面偏析現象について説明する。

#### 【0029】

図2はMnの表面偏析現象の説明図である。

Mnの表面偏析現象の解析に当たっては、InP/InGaAsの多層構造にMnを混入した構造体を、MOVPE法により結晶成長させて作製する。

#### 【0030】

ここでは、厚さ150nmのInGaAs層、厚さ80nmのInP層、厚さ120nmのInGaAs層、厚さ80nmのInP層、および厚さ100nmのInGaAs層を順に積層した多層構造体を作製する。その結晶成長には、原料として、ホスフィン(PH<sub>3</sub>)、アルシン(AsH<sub>3</sub>)、トリメチルインジウム(TMI)、トリエチルガリウム(TEG)を用い、Mn原料としてビスメチルシクロペンタジエニルマンガンの(MeCP)<sub>2</sub>Mnを用いる。成長温度は約450℃とし、MnはInGaAs層を成長させる際に、(MeCP)<sub>2</sub>Mnを同時に流すことにより導入する。Mn-P結合がより安定に形成されるために、成長温度が低い(300~450℃程度)場合、Mnがクラスタを形成せずに結晶中に混晶の形で取り込まれるが、成長温度が高くMnPクラスタを形成してしまえば、結局光の損失につながってしまう。

#### 【0031】

このように作製されたサンプルの解析は、断面構造を透過型電子顕微鏡(Transmission Electron Microscopy, TEM)により観察し、各層の原子組成比をエネルギー分散型X線分光法(Energy Dispersive X-ray Spectroscopy, EDS)により分析する。

#### 【0032】

ここでは、EDS組成分析は、図2中に示す各スポット(スポット1~7)について行っている。表1に各スポットでのEDS組成分析結果を示す。

#### 【0033】

#### 【表1】

10

20

30

40



単位 : Atom%

	In	Ga	As	P	Mn
スポット1	29.8	21.0	48.3	0.6	0.3
スポット2	53.8	0	1.4	44.7	0.1
スポット3	0.6	0.3	8.7	47.8	42.6
スポット4	23.7	26.6	49.1	0.4	0.2
スポット5	49.2	0.1	1.5	49.0	0.2
スポット6	0.2	0.1	7.0	49.5	43.2
スポット7	17.1	31.1	50.3	0.8	0.7

0034】

1に示したように、InGaAs層中のスポット1、4、7においては、In、Ga、Sの各原子がその組成の大部分を占め、P、Mnの各原子はどちらもほとんど含まれない。また、InP層中のスポット2、5においては、In、Pの各原子がその組成の大部分を占め、Ga、As、Mnの各原子はいずれもほとんど含まれない。

0035】

しかし、同じくInP層中のスポット3、6について見ると、InP層内の測定点であるにもかかわらず、In原子はほとんど含まれておらず、P、Mnの各原子がその組成の大部分を占めていることがわかる。これは、InGaAs層成長中にMnをドーピングしたにもかかわらず、そのMn原子の大半がその表面偏析現象によってInGaAs層表面に析出し、InP成長とともにInP層中にMnP結晶として取り込まれたことを示している。Mnは、図2に示したように、InP層内で、さまざまな分布形状で取り込まれているものと推定される。

0036】

この現象は、異種元素間の結合エネルギーの大ききから定性的に説明することができる。文「The nature of the chemical bond and the structure of molecules and crystals : A introduction to modern structural chemistry, by Linus Pauling, third edition, New York, Cornell University Press (1960)」によると、異種元素A、B間の結合エネルギーをD(A-B)、A-A間およびB-B間の結合エネルギーをそれぞれD(A-A)およびD(B-B)、A元素およびB元素の電気陰性をそれぞれX<sub>A</sub>およびX<sub>B</sub>としたとき、D(A-B)は、次式(1)に従う算術平均によって近似的に求めることができる。

0037】

数1】  
$$D(A-B) = \{ D(A-A) + D(B-B) \} / 2 + 23 (X_A - X_B)^2 \quad (1)$$
文献に与えられているD(As-As)=32.1(kcal/mol)、D(P-P)=51.3(kcal/mol)、X<sub>As</sub>=2.0、X<sub>P</sub>=2.1、X<sub>Mn</sub>=1.5のから、Mn-P元素間の結合エネルギーD(Mn-P)と、Mn-As元素間の結合エネルギーD(Mn-As)はそれぞれ次の式(2)、(3)で与えられる。

0038】

数2】  
$$D(Mn-P) = \{ D(Mn-Mn) + 51.3 \} / 2 + 8.28 \quad (2)$$

0039】

数3】

10

20

30

40

50

BEST AVAILABLE

$$D(Mn-As) = \{D(Mn-Mn) + 32.1\} / 2 + 5.75 \quad (3)$$

式(2)、(3)より、 $D(Mn-P) > D(Mn-As)$ であることがわかる。このことから、 $Mn-As$ 結合を解離させるのに比べて $Mn-P$ 結合を解離させるためにはより大きなエネルギーが必要になるといえる。すなわち、 $Mn-P$ 結合が、 $Mn-As$ 結合に比べてより安定であることがわかる。

#### 【0040】

このような結合エネルギーの関係に基づき、 $InGaAs$ 層成長中にドーピングされた $Mn$ は、 $InGaAs$ 層表面に析出し、続く $InP$ 成長とともに $InP$ 層中に $MnP$ 結晶として取り込まれるようになる。

#### 【0041】

第1の実施の形態に係る導波路型ファラデー回転素子10の製造に当たっては、このような $Mn$ の表面偏析現象を利用することができる。

図3は第1の実施の形態の導波路型ファラデー回転素子の製造フローを示す図である。

#### 【0042】

導波路型ファラデー回転素子10の製造は、これを構成する各層を順に結晶成長させることによって形成する。結晶成長にはMOVPE法を用い、原料として $PH_3$ 、 $AsH_3$ 、 $TMI$ 、 $TEG$ 、磁性元素である $Mn$ の原料として $(MeCP)_2Mn$ を用いる。成長温度は $300^\circ C \sim 450^\circ C$ 程度の温度範囲で行う。成長温度が $300^\circ C$ を下回る場合には、原料となる有機金属ガスの分解が起こりにくくなるため結晶の成長効率が著しく低下し、 $450^\circ C$ を上回る場合には、先に示した実験の通り、熱による凝集のため成長した結晶中にクラスタが形成されて結晶性が悪化したり導入させた $Mn$ が脱離したりしてしまうためである。

#### 【0043】

以下、各層の形成工程を順を追って説明する。

化合物半導体基板（集積される半導体レーザなどの光デバイスと同一基板であってもよい）の上に、 $InP$ クラッド層11を成長させる（ステップS1）。 $InP$ クラッド層11は、例えば、 $PH_3$ 雰囲気中で基板に対して水素をキャリアガスとした $TMI$ の有機金属ガスを導入することによって、約 $0.5 \mu m$ の膜厚に形成する。

#### 【0044】

次いで、 $InP$ クラッド層11上に、 $InP$ クラッド層11よりも屈折率の高い $InGaAsP$ 層12bを、 $Mn$ を導入しながら成長させる（ステップS2）。 $InGaAsP$ 層12bは、例えば、 $PH_3$ および $AsH_3$ の混合雰囲気中で水素をキャリアガスとして $TMI$ および $TEG$ を導入することによって、約 $0.05 \mu m \sim 0.1 \mu m$ に形成する。この $InGaAsP$ 層12bの形成の際には、 $Mn$ 原料である $(MeCP)_2Mn$ も同時に導入するようにする。ここで導入された $Mn$ は、その表面偏析現象によって、 $InGaAsP$ 層12b表面に多く存在するようになる。

#### 【0045】

次いで、 $InGaAsP$ 層12b上に、 $InP$ 層を成長させる（ステップS3）。ここで成長させる $InP$ 層は、例えば、 $PH_3$ 雰囲気中で水素をキャリアガスとして $TMI$ を導入することによって、約 $0.05 \mu m \sim 0.1 \mu m$ に形成する。その際、この $InP$ 層の下層にある $InGaAsP$ 層12b表面には、ステップS3において導入した $Mn$ が偏析しており、上述のように $Mn-As$ 結合よりも $Mn-P$ 結合が形成されやすいことから、 $Mn$ がこの $InP$ 層に取り込まれるようになる。これにより、 $InGaAsP$ 層12b上には、 $Mn$ が含有された $InP$ 層である $InP:Mn$ 層12aが形成されるようになる。

#### 【0046】

次いで、この $InP:Mn$ 層12a上に、ステップS2と同様に、 $Mn$ を導入しながら $InGaAsP$ 層12bを成長させ（ステップS4）、表面に $Mn$ が偏析した $InGaAsP$ 層12bを形成する。その膜厚は、例えば、約 $0.05 \mu m \sim 0.1 \mu m$ とする。

#### 【0047】

これにより、 $InP$ クラッド層11上には、 $InP:Mn$ 層12aが $InGaAsP$ 層1

10

20

30

40

50

2bで挟まれた構造のInP:Mn/InGaAsPコア層12が形成される。なお、通常は、InP:Mn/InGaAsPコア層12全体で、その膜厚が約0.2μm~0.3μmとなるように形成する。

#### 【0048】

さらに、ステップS4で形成したInGaAsP層12b上に、ステップS3と同様に、InP層を成長させ(ステップS5)、InP:Mnクラッド層13を形成する。その膜厚は、例えば、約0.5μmとする。

#### 【0049】

そして、導波路のメサ構造を形成し(ステップS6)、その上にInP埋め込み層14を成長させ(ステップS7)、導波路型フアラデー回転素子10の基本構造を完成する。

#### 【0050】

なお、この製造方法では、InGaAsP層12bを形成する際に上層のInP層に含有させるべきMnを導入するようにしたが、InGaAsP層12b形成時にはMnは導入せず、InP層の形成時にMnを導入するようにすることもできる。

#### 【0051】

図4はInP層の形成時にMnを導入する場合の導波路型フアラデー回転素子の製造フローを示す図である。

かかる場合の導波路型フアラデー回転素子10の製造は、まず、InPクラッド層11を成長させ(ステップS10)、その上に、InGaAsP層12bを成長させる(ステップS11)。ただし、ここでは(MeCP)<sub>2</sub>Mnの導入は行わない。

#### 【0052】

ステップS11に続き、形成したInGaAsP層12b上に、Mnを導入しながらInP層を成長させる(ステップS12)。これにより、InGaAsP層12b上には、InP:Mn層12aが形成される。このInP:Mn層12aは、例えば、PH<sub>3</sub>雰囲気中で水素をキャリアガスとしてTMIを導入すると同時に、(MeCP)<sub>2</sub>Mnと一緒に流すことによって形成する。

#### 【0053】

そして、ステップS11と同様に、(MeCP)<sub>2</sub>Mnを導入することなくInGaAsP層12bを成長させ(ステップS13)、ステップS12と同様に、Mnを導入しながらInP層を成長させ(ステップS14)、InP:Mnクラッド層13を形成する。これにより、InP:Mn/InGaAsPコア層12が形成される。

#### 【0054】

最後に、導波路のメサ構造を形成し(ステップS15)、その上にInP埋め込み層14を成長させ(ステップS16)、導波路型フアラデー回転素子10の基本構造を完成する。

#### 【0055】

このように、InP層の形成時にMnを導入するようにすると、Mn-As結合よりもMn-P結合が形成されやすいことから、InP層ではInGaAsP層とは異なり、表面偏析が起こりにくい。そのため、InP層の形成時に導入されたMnは、そのままInP層内に留まり、InP:Mn層を形成することができる。これにより、InGaAsP層12b表面にMnの偏析のない良好な結晶層を形成でき、高性能な導波路型フアラデー回転素子10を形成することができる。

#### 【0056】

導波路型フアラデー回転素子10を製造するこれらの異なる方法においては、いずれの場合も、クラッド層およびコア層に有効にMnを導入することができ、Mnの表面偏析を抑制することができる。これにより、InP:Mn/InGaAsPコア層12を導波する光の損失が抑制される。

#### 【0057】

また、化合物半導体材料を用いて高性能な導波路型フアラデー回転素子10を製造できるので、光通信システムで広く利用される波長帯においても、半導体レーザ、光アンプ、光

10

20

30

40

50

増幅器、光合成器／分波器などの光デバイスとの集積が可能になる。

#### 【0058】

次に、第2の実施の形態について説明する。

この第2の実施の形態の導波路型ファラデー回転素子は、導波路となるコア層の構造が、第1の実施の形態の導波路型ファラデー回転素子10と相違しており、そのほかの構造は、第1の実施の形態の導波路型ファラデー回転素子10と同じである。

#### 【0059】

図5は第2の実施の形態に係る導波路型ファラデー回転素子の層構造の一部を示す図である。ただし、図5では、第1の実施の形態の導波路型ファラデー回転素子10の層構造を示した図1に示している構成要素と同一の要素については同一の符号を付し、その説明の詳細は省略する。 10

#### 【0060】

第2の実施の形態の導波路型ファラデー回転素子20において、InPクラッド層11およびInP:Mnクラッド層13の間には、InGaAs層とMnを含有するInP:Mn層またはInGaP:Mn層とを順に積層させた超格子構造のIn(Ga)P:Mn/InGaAs超格子コア層21が形成されている。このような積層構造の導波路のメサ構造が、InP埋め込み層14によって埋め込まれ、導波路型ファラデー回転素子20が構成されている。

#### 【0061】

この導波路型ファラデー回転素子20の各層の屈折率は、In(Ga)P:Mn/InGaAs超格子コア層21が高く、これを挟むInPクラッド層11およびInP:Mnクラッド層13が低くなっている。この屈折率差により、In(Ga)P:Mn/InGaAs超格子コア層21が、光を閉じ込め、導波路として機能する。そして、磁気光学効果を持つIn(Ga)P:Mn層およびInP:Mnクラッド層13により、ファラデー効果が発現される。 20

#### 【0062】

導波路型ファラデー回転素子20は、第1の実施の形態の導波路型ファラデー回転素子10と同様、In(Ga)P:Mn/InGaAs超格子コア層21およびInP:Mnクラッド層13の両方にMnが含有されていることで、光とMnとの相互作用が高められる構造になっている。 30

#### 【0063】

次に、この第2の実施の形態の導波路型ファラデー回転素子20の製造方法について説明する。

図6は第2の実施の形態の導波路型ファラデー回転素子の製造フローを示す図である。

#### 【0064】

導波路型ファラデー回転素子20の製造は、まず、InPクラッド層11を成長させ（ステップS20）、その上に、In(Ga)P:Mn/InGaAs超格子コア層21を形成する。

#### 【0065】

このIn(Ga)P:Mn/InGaAs超格子コア層21の形成は、まず、InPクラッド層11上に、Mnを導入しながらInGaAs層を成長させる（ステップS21）。InGaAs層は、例えば、ASH<sub>3</sub>雰囲気中で水素をキャリアガスとしてTMIおよびTEGを導入することによって形成する。その際、同時にMn原料である(MeCP)<sub>2</sub>Mnも導入する。導入されたMnの多くは、InGaAs層表面に偏析するようになる。 40

#### 【0066】

そして、このInGaAs層上に、InP層またはInGaP層を成長させる（ステップS22）。これにより、InGaAs層表面に偏析していたMnがInP層またはInGaP層に取り込まれ、InP:Mn層またはInGaP:Mn層が形成される。なお、ステップS22において、InGaP層を形成する場合には、例えば、PH<sub>3</sub>雰囲気中でTMIおよびTEGを導入する。 50

#### 【0067】

このようなステップS21、S22の結晶成長を所定回数だけ繰り返し、超格子を形成する(ステップS23)。これにより、 $\text{In}(\text{Ga})\text{P}:\text{Mn}/\text{InGaAs}$ 超格子コア層21が形成される。ただし、その最上層は、Mnが表面に偏析された $\text{InGaAs}$ 層とする。このような $\text{In}(\text{Ga})\text{P}:\text{Mn}/\text{InGaAs}$ 超格子コア層21は、通常、その全体の膜厚が約0.2 $\mu\text{m}$ ~0.3 $\mu\text{m}$ となるように形成する。

#### 【0068】

次いで、 $\text{In}(\text{Ga})\text{P}:\text{Mn}/\text{InGaAs}$ 超格子コア層21上に、 $\text{InP}$ 層を成長させ(ステップS24)、 $\text{InP}:\text{Mn}$ クラッド層13を形成する。すなわち、 $\text{InP}:\text{Mn}$ クラッド層13は、 $\text{InP}$ 層を成長させることによって $\text{In}(\text{Ga})\text{P}:\text{Mn}/\text{InGaAs}$ 超格子コア層21最上層の $\text{InGaAs}$ 層に表面偏析したMnが取り込まれて形成されるが、所望のMn組成比を得るために、もちろんMnを同時に導入しながら形成しても構わない。

#### 【0069】

最後に、導波路のメサ構造を形成し(ステップS25)、その上に $\text{InP}$ 埋め込み層14を成長させ(ステップS26)、導波路型フアラデー回転素子20の基本構造を完成する。

#### 【0070】

また、 $\text{InP}$ 層または $\text{InGaP}$ 層の形成時にMnを導入することも可能である。図7は $\text{InP}$ 層または $\text{InGaP}$ 層の形成時にMnを導入する場合の導波路型フアラデー回転素子の製造フローを示す図である。

#### 【0071】

かかる場合の導波路型フアラデー回転素子20の製造は、まず、 $\text{InP}$ クラッド層11を成長させ(ステップS30)、その上に、 $\text{In}(\text{Ga})\text{P}:\text{Mn}/\text{InGaAs}$ 超格子コア層21を形成する。

#### 【0072】

この $\text{In}(\text{Ga})\text{P}:\text{Mn}/\text{InGaAs}$ 超格子コア層21の形成は、まず、 $\text{InP}$ クラッド層11上に $\text{InGaAs}$ 層を成長させる(ステップS31)。そして、その上に、 $(\text{MeCP})_2\text{Mn}$ を導入しながら $\text{InP}$ または $\text{InGaP}$ を成長させ(ステップS32)、 $\text{InP}:\text{Mn}$ 層または $\text{InGaP}:\text{Mn}$ 層を形成する。

#### 【0073】

このステップS31、S32の結晶成長を所定回数だけ繰り返して超格子を形成し(ステップS33)、これにより、 $\text{In}(\text{Ga})\text{P}:\text{Mn}/\text{InGaAs}$ 超格子コア層21を形成する。

#### 【0074】

そして、この $\text{In}(\text{Ga})\text{P}:\text{Mn}/\text{InGaAs}$ 超格子コア層21上に、 $(\text{MeCP})_2\text{Mn}$ を用いてMnを導入しながら $\text{InP}$ を成長させ(ステップS34)、 $\text{InP}:\text{Mn}$ クラッド層13を形成する。

#### 【0075】

最後に、導波路のメサ構造を形成し(ステップS35)、その上に $\text{InP}$ 埋め込み層14を成長させ(ステップS36)、導波路型フアラデー回転素子20の基本構造を完成する。

#### 【0076】

導波路型フアラデー回転素子20を製造するこれらの異なる方法においては、いずれの場合も、クラッド層およびコア層に有効にMnを導入することができ、 $\text{In}(\text{Ga})\text{P}:\text{Mn}/\text{InGaAs}$ 超格子コア層21を導波する光の損失が抑制される。

#### 【0077】

また、化合物半導体材料を用いて高性能な導波路型フアラデー回転素子20を製造できるので、光通信システムで広く利用されている波長帯において、他の光デバイスとの集積化が可能になる。

10

20

30

40

50

#### 【0078】

なお、以上の説明において、InPクラッド層11は、その内部にMnを含有させた構造としてもよい。その場合は、例えば、PH<sub>3</sub>雰囲気中でTMIを導入してInPを成長させながら同時にMnを導入することによってInP:Mnクラッド層を形成すればよい。このような構成とすれば、Mnを含有するコア層が、Mnを含有するInP:Mnクラッド層で挟まれた構造となるため、Mnを含んだ層と光とがオーバーラップする領域が広がり、よりいっそう光とMnとの間の相互作用を高めることができるようになる。

#### 【0079】

また、以上の説明では、磁性元素としてMnを用いた場合について述べたが、本発明で用いることのできる磁性元素としては、Mnのほか、Cr、Co、Ni、Feなどの磁性元素も用いることが可能である。

#### 【0080】

また、本発明は、以上の説明において用いた材料に限定されるものではない。例えば、InGaAsPに替えてInGaAsを用いることができ、InGaAsに替えてInGaAsPを用いることも可能である。また、InPに替えてInGaPを用いることができ、InGaPに替えてInPを用いることも可能である。

#### 【0081】

##### 【発明の効果】

以上説明したように本発明では、磁性半導体層をこれよりも高い屈折率の半導体層によって挟んだ構造を有しているコア層、およびコア層を挟むクラッド層に、クラスタを形成せず磁性元素を含めるようにする。これにより、導波損失を抑えて、導波する光と磁性元素との相互作用を高めた高性能な導波路型ファラデー回転素子を実現することができる。

#### 【0082】

また、化合物半導体材料を用いて高性能な導波路型ファラデー回転素子を製造できるので、光通信システムで広く利用される波長帯において、他の光デバイスとの集積化が可能になる。

#### 【0083】

また、導波路型ファラデー回転素子の製造においては、磁性元素を、磁性半導体層の形成時あるいは磁性半導体層下層の半導体層の成長時に導入することにより、クラッド層、コア層に磁性元素を有効に導入することが可能になる。

##### 【図面の簡単な説明】

【図1】第1の実施の形態の導波路型ファラデー回転素子の層構造の一部を示す図である。

【図2】Mnの表面偏析現象の説明図である。

【図3】第1の実施の形態の導波路型ファラデー回転素子の製造フローを示す図である。

【図4】InP層の形成時にMnを導入する場合の導波路型ファラデー回転素子の製造フローを示す図である。

【図5】第2の実施の形態に係る導波路型ファラデー回転素子の層構造の一部を示す図である。

【図6】第2の実施の形態の導波路型ファラデー回転素子の製造フローを示す図である。

【図7】InP層またはInGaP層の形成時にMnを導入する場合の導波路型ファラデー回転素子の製造フローを示す図である。

##### 【符号の説明】

- 1. 2. 3. 4. 5. 6. 7 スポット
- 10. 20 導波路型ファラデー回転素子
- 11 InPクラッド層
- 12 InP:Mn/InGaAsPコア層
- 12a InP:Mn層
- 12b InGaAsP層